

MEMS 高温电容式压力传感器的研制与测试

徐 肯^a, 王绍清^a, 冯勇建^b

(厦门大学 a. 机电工程系 ;b. 微机电中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 介绍了一种用硅-硅键合 MEMS 技术制作的高温电容式压力传感器, 并给出了详细的制作工艺。文中对测试装置、测试电路进行了介绍和深入分析, 最后用此测试电路对制作的传感器器件进行了高温测试, 测试结果表明这种微传感器可在低于 350 °C 的条件下正常工作, 且具有很大的线性工作范围、良好的稳定性和较高的灵敏度, 其应用前景十分广阔。

关键词: 微机电系统; 高温; 传感器; 电容式; 压力测试

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1003-353X(2004)11-0008-04

Fabrication and Testing of the MEMS High Temperature Capacitive Pressure Micro-sensor

XU Ken^a, WANG Shao-qing^a, FENG Yong-jian^b

(Xiamen University a. Dept. of Mechanical and Electrical Engineering;

b. PEN TUNG SAH MEMS Research Center, Xiamen 361005, China)

Abstract: MEMS high temperature capacitive pressure micro-sensor that combines a touch-mode structure and the silicon-silicon fusion bonding technique are mainly introduced. The producing technology is given in details. The testing equipment and testing circuit are introduced and analyzed in details. At last, some testing experiments are done for the produced high temperature capacitive pressure micro-sensors. The results proved that this type of micro-sensor can work well under 350 °C, and has excellent linearity, relatively good stability and relatively high sensitivity; it has lots of application fields.

Key words: MEMS; high temperature; sensor; capacitive; pressure testing

1 引言

半导体传感器具有体积小、重量轻、精度高、温度特性好等特点。特别是传感器的制造工艺与半导体集成电路平面工艺兼容, 这就满足了传感器向智能化方向发展的要求^[1]。目前用于制作半导体传感器的材料主要有 SiC、Si 和 SOI 等, 但是由于 SiC 材料远没有 Si 或 SOI 材料成熟, 传感器的成本较高。

与压阻式压力传感器相比, 电容式压力传感器具有低的温漂、高灵敏度、低噪声和较大的动态范围等显著的优点。为此, 本文研制了一种高性能、

低成本的微型高温电容式压力传感器。它是一种基于 MEMS 原理基础上的新型传感器, 由硅-硅键合技术制作而成, 并采用了接触式结构, 大大提高了传感器的线性工作范围^[2]。并且这种传感器的过载保护能力强, 可承受满量程压力 2~2000 倍的压力值^[3]。测试结果表明, 该高温压力传感器具有工作温度高、工作范围广、稳定性好和灵敏度高等特点, 可以广泛应用于航空、石油、化工、冶金、锅炉等高温环境下的压力测试。

2 传感器的制作及工作原理

2.1 制作工艺

高温电容式压力传感器是硅-硅键合工艺^[4]制作而成的,需要两片硅片进行键合。其中硅片A(图1(a))用于制作具有密封腔体的传感器衬底,利用离子反应腐蚀在其上面形成一个具有一定深度的腔体,再经过氧化在腔体表面形成一层热氧化膜作为绝缘层。硅片B是利用p⁺扩散技术形成硅膜片(图1(f)),膜片的厚度取决于p⁺层的厚度,可以通过选择适当的温度和时间来精确控制p⁺层的厚度。由于经过浓硼扩散后,p⁺膜片表面的粗糙度较大,会影响键合成功率,所以还需对p⁺膜的表面进行CMP(chemical mechanical polishing)。然后将两硅片在真空条件下预键合后,再进行高温键合。键合完成后将硅片B一面用KOH溶液进行深腐蚀直到p⁺膜,再通过ICP干刻蚀刻出硅片A上的电极。最后进行金属溅射,在衬底和膜上做出金属电极。

高温电容式压力传感器主要制作步骤如图1所示。主要制作工艺过程如下:

- (1)取硅片A,清洗后经湿氧化2h,形成800nm氧化膜,见图1(a)、(b);
- (2)在氧化膜上涂光刻胶烘干后,进行离子反应刻蚀形成0.5mm深的腔体,见图1(c)、(d);
- (3)清洗硅片A,再经干氧化2h,在腔体表

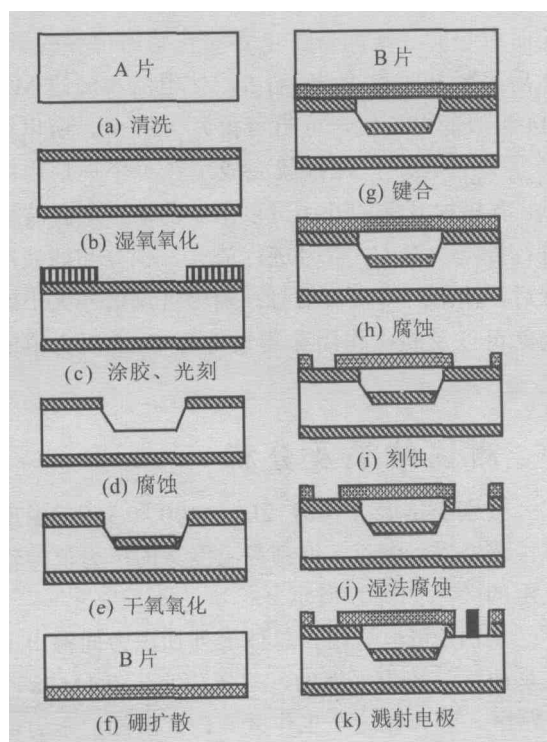


图1 高温电容式压力传感器的制作工艺过程

面形成150nm的热氧化膜作为绝缘材料,见图1(e);

(4)取硅片B,在1125℃下进行浓硼扩散6h,使其上面形成p⁺膜,再进行CMP将p⁺膜表面抛光,见图1(f);

(5)清洗硅片A和B,用Karl Suss键合机在真空中进行两硅片的键合,见图1(g);

(6)用KOH溶液深腐蚀键合后位于上方的硅片B腐蚀到p⁺膜,见图1(h);

(7)在P⁺膜上涂光刻胶,烘干后进行离子反应刻蚀,除去多余的P⁺膜,见图1(i);

(8)用HF腐蚀掉多余的氧化膜,见图1(j);

(9)通过金属溅射制作衬底电极,见图1(k);

(10)切割晶片,封装、焊线。

2.2 传感器的工作原理

MEMS 高温电容式压力传感器实物如图2所示。其中包括了两个电容:一个是用于测量的测量电容 C_x ,另一个是用于温度补偿的参考电容 C_0 。图3给出了接触式结构的电容式压力传感器的工作原理图,当膜片(上电极)受到压力 p 作用时发生变形,随着压力的增大膜片与衬底的距离逐渐缩小,在压力达到接触点压力(即膜片中心接触到绝缘层时的压力)之前,测量电容器的电容值由非接触电容决定,根据公式 $C = \epsilon A/d$ 可知,在这个过程

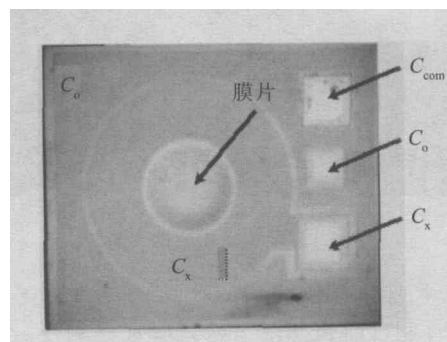


图2 高温电容式压力传感器照片

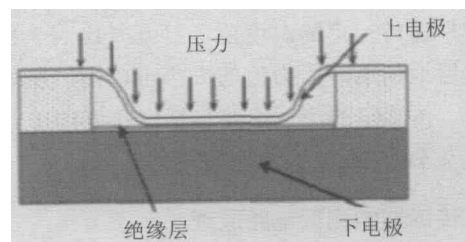


图3 高温电容式压力传感器的工作原理图

中电容的大小随着上下电极间的距离 d 而变化。当压力 p 继续增加时,达到接触点之后,测量电容值则由非接触电容和接触电容决定。在极坐标系下的非接触电容量的积分表达式为

$$C_{\mu} = \int \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_a \varepsilon_i dr}{\varepsilon_a t + \varepsilon_i [g - w(r)]},$$

式中 ε_0 为真空介电常数; ε_a 为空气的相对介电常数; ε_i 为绝缘层材料的相对介电常数; t 为绝缘层的厚度; g 为初始间隙; $w(r)$ 为半径为 r 的圆上的变形。计算时以圆形膜片的中心作为坐标原点^[3]。在一定的范围内接触区域随着压力线性地增大,从而使电容值产生线性的变化。通过选择适当膜片的尺寸、厚度和电极的间距等的器件参数,可以提高传感器的灵敏度和线性范围。

3 高温传感器的测试装置及电路

3.1 高温测试实验台及电路

传感器的测试是在如图4所示的实验台上进行的。实验台是由基座1、气压表2、气压阀3、外接测试电路接口4、密闭的加压腔5和温度控制器6

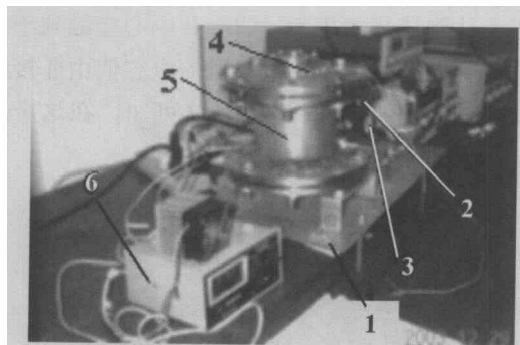


图4 高温传感器测试实验台

等几个主要部分构成的。传感器已经置于加压腔内,进行测试时将测试电路接到外接测试电路接口4上,启动温度控制器6开始对加压腔加温,使加压腔里保持一定的温度值,打开气压阀3利用空压机缓慢地加压,压力值的大小可以由气压表2直接读出。传感器的测试电路包括焊接好的电路板、信号发生器、数字式电压表等。

3.2 传感器的测试电路原理

在测试时,传感器置于高温环境中,而其他

仪器则应尽可能地远离高温环境,这必然要求加长传感器的接线,然而,由于传感器本身的电容值很小(几十皮法),所以如果导线过长,那么传感器的电容会被导线之间的寄生电容所淹没。为了解决这个问题,在测试时采用了补偿电容 C_0 和补偿电源 V_0 进行补偿。采用了CMOS电路有效地消除杂散电容地影响^[5]。传感器的测试电路基本原理图如图5所示。首先,令模拟开关1和2闭合,其他开关断开,使直流源 V_s 和补偿电源 V_0 分别对 C_x 和 C_0 充电。断开开关1和2,闭合开关3和4,使 C_x 和 C_0 放电,电流经过晶体管M1和M2组成的电流

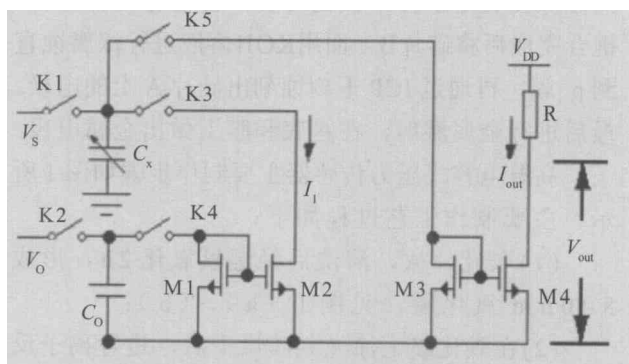


图5 测试电路基本原理图

镜后,可得到 $I_1 = I_x - I_0$,这样就消除了由于导线过长而引起的导线间寄生电容对传感器电容的影响。然后再断开3和4,闭合5,使电流再经过M3和M4组成的电流镜,分析可得 $I_{out} = I_x - I_0$,所以可得 $U_{out} = V_{DD} - R I_{out}$ 。这样就完成了在一个周期内的测试。各模拟开关的开闭可以由振荡器产生方波信号进行控制。对 U_{out} 信号进行放大、积分和滤波等处理后,输出的是直流信号,输出直流信号大小的变化就可以反映出作用在测量电容 C_x 上压力值的变化。

4 测试结果及分析

分别在常温、100, 200, 300和350 温度下对传感器进行测试,得到各温度下的压力值与输出电压的关系如图6所示。

从图6可以看出,总体上外加压力同输出电压关系曲线是较为平滑的,气压值小于0.1MPa时是正常区,因为在这个工作区间内,所加的压力值较小,传感器工作在非接触的情况下;压力逐渐增大

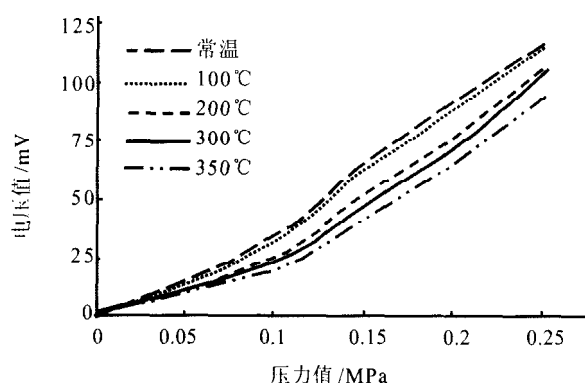


图6 测试结果

时,会出现一个过渡的过程(0.1~0.15MPa附近),这是由于传感器的上下电极开始接触,而接触后非接触面积和间隙都减小,两者作用的总效果使得非接触电容增大,而接触发生后接触面积增大加快,接触电容的增大也相应加快,因此出现了这个过渡区;压力进一步加大,在0.15MPa附近,就进入了传感器的主要工作区,因为随着压力的增大,非接触面积和间隙继续减小,但两者的总效果使得非接触电容的增大变得缓慢,甚至减小,而在传感器非接触半径增大的同时,接触面积以一个近乎常数的增长率增大,输出电容以接触电容为主,测量电容随压力的变化体现了较好的线性。

根据以上的分析可知该传感器的接触压力约为0.1MPa;接触后的主要工作范围在0.15~0.25MPa,压力与输出电压之间测量线性度约为2%;压力大于0.3MPa时,进入饱和区域,灵敏度有所下降。随着温度的升高,膜片材料变软,在非接触情况下的灵敏度有所下降,但是在接触以后的灵敏度基本不变,此问题可用软件进行修正。

5 结论

通过 MEMS 高温电容式压力传感器的制作及对传感器的测试和分析,证明这种传感器可工作于较高的温度下,且具有较宽的线性工作范围、良好的稳定性和较高的灵敏度,可以广泛应用于航空、石油、化工、冶金、锅炉等高温环境下的压力测试。还可以通过改善敏感元件、电容器的物理特性,改变传感器的尺寸,进一步提高传感器的工作范围、灵敏度等。

参考文献:

- [1] 刘艳艳,姚素英.高性能高温压力传感器[J].半导体技术,2001,26(5):12-16.
- [2] KO W H, WANG Q, WANG Y. Touch Mode capacitive pressure sensors for industrial application[A]. Technical Digest Solid State Sensors and Actuator Workshop[C]. Hilton Head Island, 1996, 244-248.
- [3] 许金海,颜黄萍,冯勇建.基于小扰度假使的电容式微型压力传感器模型[J].传感器技术,2002,19(6):18-21.
- [4] WANG Q, KO W H. Si-to-Si fusion bonded touch mode capacitive pressure sensors[J]. Mechatronics, 1998, (8):467-484.
- [5] 许金海,冯勇建,邓俊泳.电容式测压微传感器的特性分析[J].仪器仪表学报,2001,22(4):434-436.

(收稿日期:20040219)

作者简介:

徐肯(1980-),男,广东澄海人,硕士在读,主要研究方向为半导体微型电容式压力传感器的制作与测试;

王绍清(1981-),女,福建福清人,硕士在读,主要研究方向为半导体微型电容式压力传感器的制作与测试;

冯勇建(1958-),男,副教授,生于新疆,1994年于西南石油学院获得博士学位,1997年至今任教于厦门大学机电工程系,主要研究方向是传感器、执行器及集成电路的设计。

(上接第4页)

- [16] SHARIFI S, HOSSEINABADI M, RIAHI P, et al. Reducing test power, time and data volume in SOC testing using selective trigger scan architecture[A]. Int Symp on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems[C]. Boston, Massachusetts, USA, 2003, 352-360.

(收稿日期:20040311)

作者简介:

陈新武(1969-),1993年毕业于河南师范大学物理系物理电子专业,获理学学士学位,1993~2002年在信阳师范学院物理系任教,2002年至今在华中科技大学图像识别与人工智能研究所IC设计中心攻读硕士研究生;

陈朝阳(1966-),男,副教授,博士后。